Instrumentación de la estación hidrométrica Los Aldamas, Nuevo León

S. Tamari, A. Aguilar, V. Mejía, A. López, R. Álvarez y S. Ortega

Resumen

Se presenta el desarrollo de un equipo para conocer en tiempo real el gasto en el río San Juan, a la altura de la estación hidrométrica Los Aldamas, N.L. Basándose en una relación experimental entre el gasto y el tirante en el río, se propuso estimar el gasto por medio de un equipo capaz de medir el tirante. Dicho equipo consta de un sensor de presión sumergible y un sistema de adquisición de datos. Los datos (fecha, tirante, gasto estimado, volumen de agua acumulado, alertas) se despliegan cada minuto en una pantalla ubicada dentro de una caseta de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). También son enviados a Internet por medio de una antena satelital cada dos horas. El equipo empezó a operar en junio del 2005. Se verificó durante un año que sus datos fueron consistentes con los de aforo clásico realizados por el personal de la Conagua. Hasta donde sabemos, es la primera vez que en el país se pone en operación un equipo automatizado para monitorear el gasto en un río.

Introducción

Según se establece en el artículo 7 de la Ley de Aguas Nacionales (Semarnat, 2004), es de utilidad pública la instalación de los dispositivos necesarios para medir la cantidad y la calidad de las aguas nacionales. En este ámbito, la Conagua ha realizado varias acciones para mejorar la medición del gasto del agua en obras de toma de las presas, pozos agrícolas, canales de riego y zonas de abastecimiento urbano (Arroyo *et al.*, 2004; Ruiz *et al.*, 2004).

Sin embargo, cuando se trata de medir el gasto en los cauces naturales del país, se sigue utilizando la técnica clásica que consiste en determinar perfiles de velocidad con un molinete y aplicar el método denominado "área-velocidad" (ISO, 1997). Esta solución es laboriosa y no permite hacer mediciones en forma continua. Hasta donde sabemos, en el país todavía no se han puesto en operación otras alternativas para medir el gasto en cauces naturales.

En 2004, la Subgerencia de Operación de la Gerencia de Distritos y Unidades de Riego de la Conagua encargó al IMTA un sistema que estime en tiempo real el gasto, para poder determinar el volumen de agua acumulado que pasa por la estación hidrométrica Los Aldamas.

Problemática a atender

Importancia de la estación Los Aldamas

La estación hidrométrica Los Aldamas se encuentra en Nuevo León, sobre el río San Juan (ilustración 1). Dicha estación ayuda a determinar las principales aportaciones que ingresan a la presa Marte R. Gómez, *El Azúcar*. Tiene dos tipos de régimen de descarga: el periodo de lluvias, que son aportaciones de toda la cuenca, y el periodo de estiaje, que sólo tiene aportaciones de la ciudad de Monterrey y trasvases programados desde la presa Solidaridad, *El Cuchillo*.

Desde hace varios años, el personal de la Conagua utiliza molinetes para estimar el gasto del río San

Juan a la altura de la estación Los Aldamas. También utiliza una escala marina ubicada en la pila de un puente de ferrocarril para medir el tirante en el río.

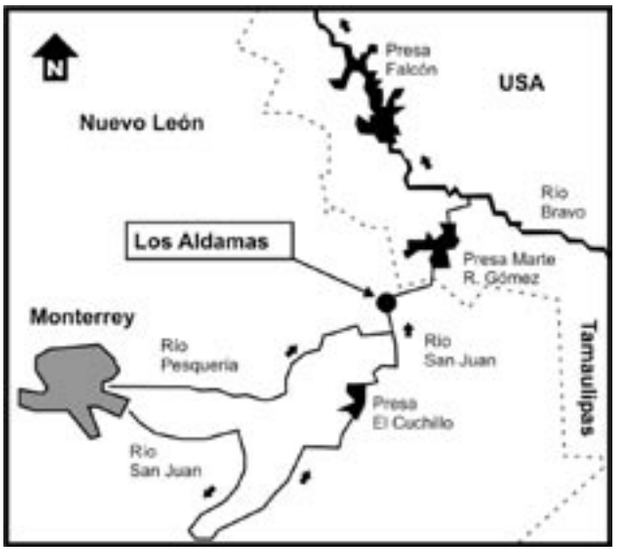

Ilustración 1. Croquis de ubicación de la estación hidrométrica Los Aldamas.

Selección de un método para monitorear el gasto

Se contemplaron tres alternativas para instrumentar la estación Los Aldamas:

- Instalar un aforador de garganta en el cauce del río. Se descartó esta primera alternativa (ISO, 1997), porque se tendría que hacer una gran inversión.
- Monitorear el flujo en el cauce del río. Esta segunda alternativa está basada en el método "área-velocidad" (ISO, 1997). Requiere instalar en el cauce del río un medidor automático de flujo, como son los medidores que utilizan sensores ultrasónicos de tiempo de tránsito (ISO, 2004) o sensores basados en el efecto Doppler. Sin embargo, la sección de aforo de la estación Los Aldamas no es muy adecuada para la instalación de estos medidores, porque es bastante irregular (ISO, 1997).
- Monitorear el tirante en el río San Juan. Esta tercera alternativa se basa en el método denominado "tirante-gasto" (ISO, 1996, 1998), el cual requiere tener una relación confiable entre el tirante y el gasto a la altura de la estación hidrométrica y un equipo para monitorear el nivel del agua. Como se verá a continuación, es factible implementar esta alternativa para Los Aldamas.

Principales requisitos para la instrumentación

Considerando que se iba a monitorear el tirante en el río San Juan y estimar el gasto a partir de una relación "tirante-gasto", los requisitos para instrumentar la estación Los Aldamas serían (ilustración 2):

- Lugar para realizar las mediciones. Se tenía que colocar el sensor de nivel cerca de la escala marina que se utilizó para determinar la relación "tirante-gasto". Dicha escala se encuentra a un costado de la pila de un puente de ferrocarril, que mide más de 16 m de alto (ilustración 3).

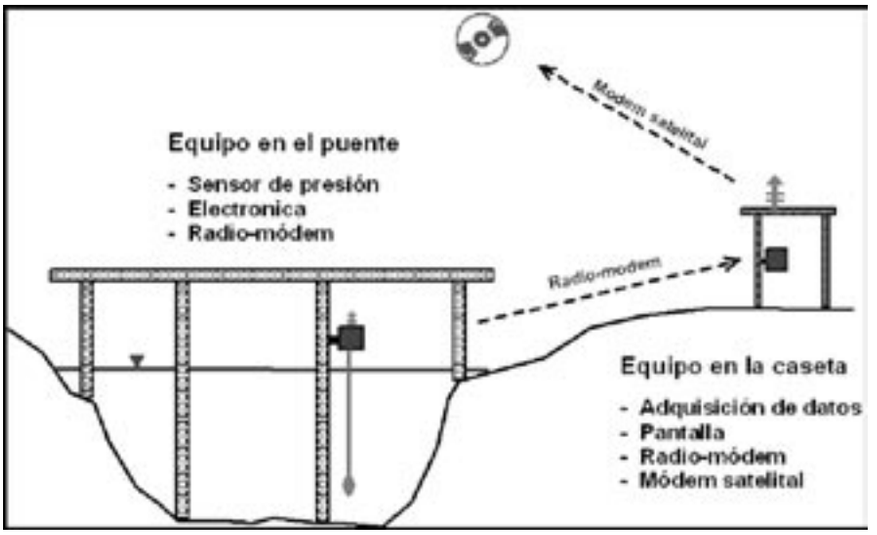

Ilustración 2. Esquema del equipo para monitorear el tirante y estimar el gasto en la estación Los Aldamas.

• Lugar para adquirir los datos. Se tenía que instalar el sistema de adquisición de datos en una caseta de la Conagua, la cual se encuentra a una distancia de ≈ 300 m del puente de ferrocarril.

Ilustración 3. Puente de ferrocarril a la altura de la estación Los Aldamas.

• Mediciones requeridas. Cada minuto, se tenía que desplegar en la pantalla del sistema de adquisición de datos la siguiente información: fecha y hora, tirante en el río (m), gasto estimado (m^3/s) y volumen de agua totalizado desde el inicio del año agrícola (Mm^3). Cada dos horas, se tenía que almacenar los datos registrados en una unidad de respaldo y enviarlos por telemetría hacía un sitio Internet donde se encuentra una base de datos de la Comisión Nacional del Agua.

• Rango de las mediciones. Por un lado, resulta que el gasto del río San Juan es casi nulo cuando el tirante es menor a 1.7 m en la estación Los Aldamas. Por otro lado, el tirante es casi siempre menor a 8 m (alcanzó excepcionalmente los 16 m durante el paso del huracán *Gilberto*). Por lo tanto, se tenía que considerar un equipo capaz de medir un tirante entre ≈ 1.5 y 10 m (y que pudiera soportar un tirante extremo de hasta ≈ 15 m).

• Precisión de las mediciones. Para poder estimar adecuadamente el gasto a partir de una relación "tirante-gasto", es deseable medir el tirante con una precisión del orden de ± 10 mm, cuando la escala máxima de medición es de ≈ 10 m (ISO, 1995).

• Robustez del equipo. Un requisito importante de los equipos de medición que se instalan en el campo es que sean robustos (ISO, 1995). Deben ser adecuadamente protegidos contra los agentes de la intemperie (humedad, luz solar, altas temperaturas, rayos, corrosión) y cualquier otro agente que ponga en riesgo su funcionamiento (insectos, polvo, vandalismo).

• Suministro de energía. Como no era posible tender un cable eléctrico desde la caseta de la Conagua hacia la pila del puente de ferrocarril, la comunicación entre el sensor de nivel y el sistema de adquisición de datos tenía que ser inalámbrica. La alimentación eléctrica del sensor de nivel también debía de ser por medio de un panel solar.

• Necesidades de mantenimiento. Excepto en casos muy particulares (p.e., cuando se tiene que enviar un equipo al espacio), no se puede dejar un equipo de medición automatizado trabajando solo todo el tiempo. De hecho, la mayoría de los sensores tienden en descalibrarse a un punto tal, que es necesario volver a calibrarlos de vez en cuando. También puede ser necesario dar mantenimiento a los sistemas de adquisición de datos (p.e., cambio de baterías, limpieza de paneles solares, reemplazo de los cartuchos desecantes). Considerando que el equipo que se iba a instalar en Los Aldamas tuviera una vida útil de por lo menos cinco años, se planteó como requisito no tener que darle mantenimiento más de dos veces al año.

Solución propuesta

Determinación de la relación tirante-gasto en Los Aldamas

Para aplicar el método basado en la relación "tirante-gasto", es deseable tener una sección de control aguas abajo de la estación hidrométrica (ISO, 1996). Esta condición se cumple para la estación Los Aldamas, ya que se tiene una sección de control natural aguas abajo, donde el cauce hace un viraje hacia la derecha (ilustración 4).

En 2004, se recopilaron los datos de aforo obtenidos en los años anteriores por la Conagua con el fin de establecer la relación "tirante-gasto" a la altura de la estación Los Aldamas. También se utilizaron un velocímetro y un perfilador ultrasónicos basados en el efecto Doppler para verificar esta relación (Arroyo Correa *et al.*, 2004). Los datos experimentales se ajustaron por medio de un polinomio de octavo grado (ilustración 5).

Ilustración 4. Vertedor natural aguas abajo de la estación Los Aldamas.

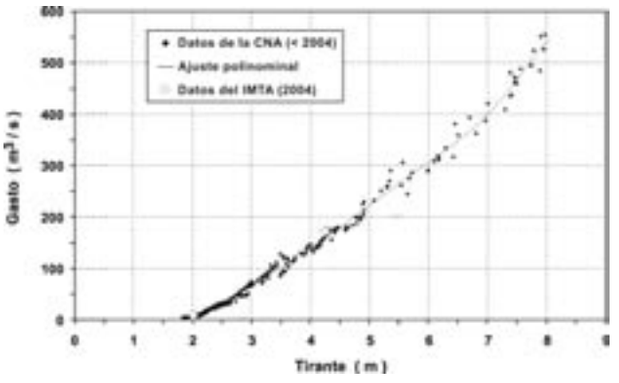

Ilustración 5. Relación "tirante-gasto" obtenida con datos históricos de aforo para la estación Los Aldamas.

Selección de un sensor para monitorear el tirante

En la actualidad, se utilizan comúnmente cinco categorías de sensores para monitorear el tirante en los cuerpos de agua: flotadores, sensores de presión sumergibles, sensores de presión con sistema de burbujeo, sensores ultrasónicos y radar. La literatura (IOC, 1994; ISO, 1995, 1996; ITRC, 1999) sugiere que todos estos pueden usarse para monitorear el tirante con una precisión mejor que ± 20 mm. Por lo tanto, se tuvieron que analizar las ventajas y los inconvenientes de cada uno (tabla 1). Finalmente, se propuso utilizar un sensor de presión sumergible (la teoría de operación y las condiciones de manejo de este tipo de sensor se describen en Tamari *et al.*, 2005).

Si bien existen en el mercado equipos de medición con sensor de presión sumergible y sistema de adquisición o transmisión de datos, no se encontró ninguno que cumpliera con todos los requisitos específicos para Los Aldamas (o sea: equipo suficientemente preciso, despliegue de los datos en una pantalla y envío de los mismos a Internet). Por lo tanto, se optó por seleccionar el sensor de presión más adecuado y luego diseñar un sistema de adquisición de datos.

En cuanto al sensor de presión, se eligió un sensor manométrico y piezorresistivo que es el modelo "PTX 1830", de la marca GE-Druck (USA), porque era una buena alternativa entre costo, precisión y disponibilidad en el país. Basándose en las especificaciones del constructor, dicho sensor era a priori capaz de medir el nivel del agua en un rango de 0 hasta 10 m y con una precisión de ± 16 mm, mientras se estuviera calibrando cada seis meses y mientras la temperatu-

Tabla 1. Comparación entre sensores de nivel.

Sensor	Inconvenientes para Los Aldamas
Flotador con *encoder*	• Difícil de encontrar un *encoder* cuyo rango de medición sea mayor a 3 m. • Las partes mecánicas del sensor (*encoder*) pueden trabarse.
Sensor ultrasónico	• Se tendría que instalar el sensor entre dos pilas del puente; pero aparecen restos de un andamio por debajo, cuando el tirante en el río es bajo. • Difícil de proteger contra el vandalismo. • A priori, se debe monitorear la temperatura del aire para tener mediciones precisas.
Radar	
Sensor de presión (manométrico) con sistema de burbujeo	• Difícil de conseguir un sensor que pueda conectarse a un sistema de adquisición de datos cualquiera. • Las partes mecánicas del sensor (bomba) pueden trabarse. • En teoría, debe de ser menos preciso que un sensor de presión sumergible.
Sensor de presión sumergible (manométrico)	• Puede presentarse un problema de corrosión, debido a que el sensor esta en contacto con el agua. • Para tener mediciones precisas, debe cuidarse de que no haya burbujas de aire en contacto con la parte sensible del sensor y que no haya condensación en el tubo que conecta el sensor a la atmósfera. • A priori, se debe calibrar el sensor en sitio para tener mediciones precisas.

ra del agua en el río no variara más de ± 5 grados centígrados.

Construcción del equipo e instalación en campo

Después de haber elegido un sensor para medir el nivel del agua, se diseñó un sistema de adquisición de datos que cumpliera con los requisitos de la instrumentación. Algunas particularidades del equipo construido son las siguientes (Tamari *et al.*, 2005):

- La alimentación eléctrica de todo el equipo está asegurada con paneles solares. En caso de falla, las baterías del equipo tienen una autonomía de, al menos, cinco días.
- En la pila del puente de ferrocarril se tiene un tablero con componentes electrónicos (terminal remota con convertidor analógico/digital de 16 bits y radiomódem) y una escala pequeña para poder calibrar fácilmente el sensor de presión en sitio. Dicho tablero está protegido por un blindaje de acero.

Ilustración 6. Colocación del equipo de medición sobre la pila de un puente de ferrocarril.

- En la caseta de la Conagua, se tiene un gabinete con componentes electrónicos (terminal maestra con módem satelital, memoria no volátil y pantalla). El sistema de adquisición de datos procesa la información básica (o sea: determina el nivel del agua, estima el gasto y calcula el volumen acumulado). Asimismo, es capaz detectar ciertos problemas (tirante alto en el río, nivel de las baterías bajas, temperatura alta en los gabinetes del equipo) y enviar la alerta correspondiente.
- El sistema de adquisición de datos está diseñado para bloquearse sin opción a restablecimiento automático cuando ocurre una falla en su alimentación eléctrica, o si se intenta alterar su configuración sin tener el código de acceso.

El equipo de medición se probó en el laboratorio durante tres meses. Después se instaló en Los Aldamas (ilustración 6), donde empezó a operar a partir de junio del 2005 (ilustración 7)

Resultados

Problemas con el manejo del equipo

Hasta la fecha, el equipo ha trabajado durante más de 55 semanas, lo que corresponde a más de 550,000 lecturas

Ilustración 7. Equipo colocado sobre la pila del puente de ferrocarril. El blindaje negro protege la electrónica. El sensor de presión sumergible esta dentro del tubo vertical de plástico. La escala marina que sirve de referencia para medir el tirante se encuentra a la derecha del tubo.

de tirante en el río San Juan. A lo largo de un año, se tuvieron tres tipos de problemas con el manejo del equipo:

• *Fallas del equipo*. El sistema de adquisición de datos se bloqueó una sola vez, en diciembre del 2005 (todavía no se sabe bien por qué). Sin embargo, el equipo volvió a funcionar normalmente después de haber sido restablecido.

• *Necesidad de volver a calibrar el sensor de presión*. Se pensaba que sería suficiente verificar la calibración del sensor de presión instalado en Los Aldamas cada seis meses; sin embargo, nuestra experiencia indica que es necesario hacerlo cada cuatro meses. Esto se debe a que el agua del río San Juan contiene muchos sulfatos durante el periodo de estiaje (hasta 580 mg/l), los cuales provienen probablemente de la ciudad de Monterrey. Dichos sulfatos tienden a formar una capa de sarro alrededor del sensor de presión (ilustración 8). Cuando la capa es demasiado gruesa, es necesario limpiar el sensor (con un detergente a base de ácido fosfórico) y calibrarlo de nuevo.

ilustración 8. Sensor de presión con incrustaciones de sarro (nota: se limpió la parte media del sensor).

• *Paso del huracán* Emily. Cuando pasó el huracán *Emily*, el tirante en el río alcanzó valores tan altos que, durante tres días, se tuvieron gastos mayores al máximo gasto que podía estimar el equipo (o sea: 580 m^3/s). A causa de este evento extraordinario, el equipo probablemente subestimó el volumen de agua que pasó por el río San Juan en ≈ 3 Mm^3 (dicha estimación se basa en una modelación hidrológica de la relación "tirante-gasto").

Monitoreo del tirante

Durante el año que siguió a la puesta en operación del equipo (6 de junio 2005), el tirante en el río San Juan superó los 6 m en tres ocasiones: durante el paso del huracán *Emily* (19 de junio 2005, día Núm. 44 en la ilustración 9); durante un periodo de lluvias fuertes (a partir del 14 de octubre 2005, día Núm. 130), y durante un periodo de trasvases programados desde la presa Solidaridad, *El Cuchillo* (a partir del 22 de febrero 2006, día Núm. 261).

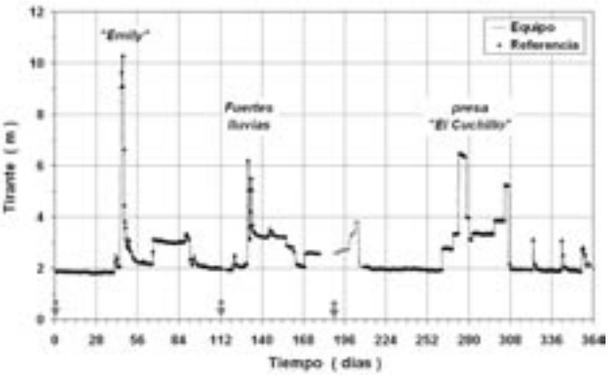

Ilustración 9. Comparación entre el tirante medido por el equipo (desde el 6 de junio 2005 a las 17:00) y el tirante de referencia (datos de aforo de la Conagua). Las flechas indican cuándo se tuvo que calibrar el sensor de presión del equipo.

En su mayoría (65% de los valores registrados), las diferencias entre el tirante registrado por el equipo y el tirante medido con base a la escala marina de la Conagua fueron inferiores a 25 mm, lo que es bastante satisfactorio. Sin embargo, se debe reconocer que las diferencias alcanzaron a veces los 40 mm (tal como se comentó en el inciso anterior, esta situación se debe, sobre todo, a una descalibración del sensor de presión causada por incrustaciones de sarro).

Como se puede apreciar en la ilustración 10 (avenida grande durante el paso del huracán *Emily*) y en la ilustración 11 (avenida pequeña causada por las lluvias), el equipo es capaz de monitorear con una muy buena resolución temporal los cambios de tirante en el río San Juan. Esto hace del equipo una herramienta útil para enviar alertas en caso de avenida.

Estimación del gasto

Un análisis gráfico de los datos, también sugiere que los gastos estimados por el equipo son consistentes

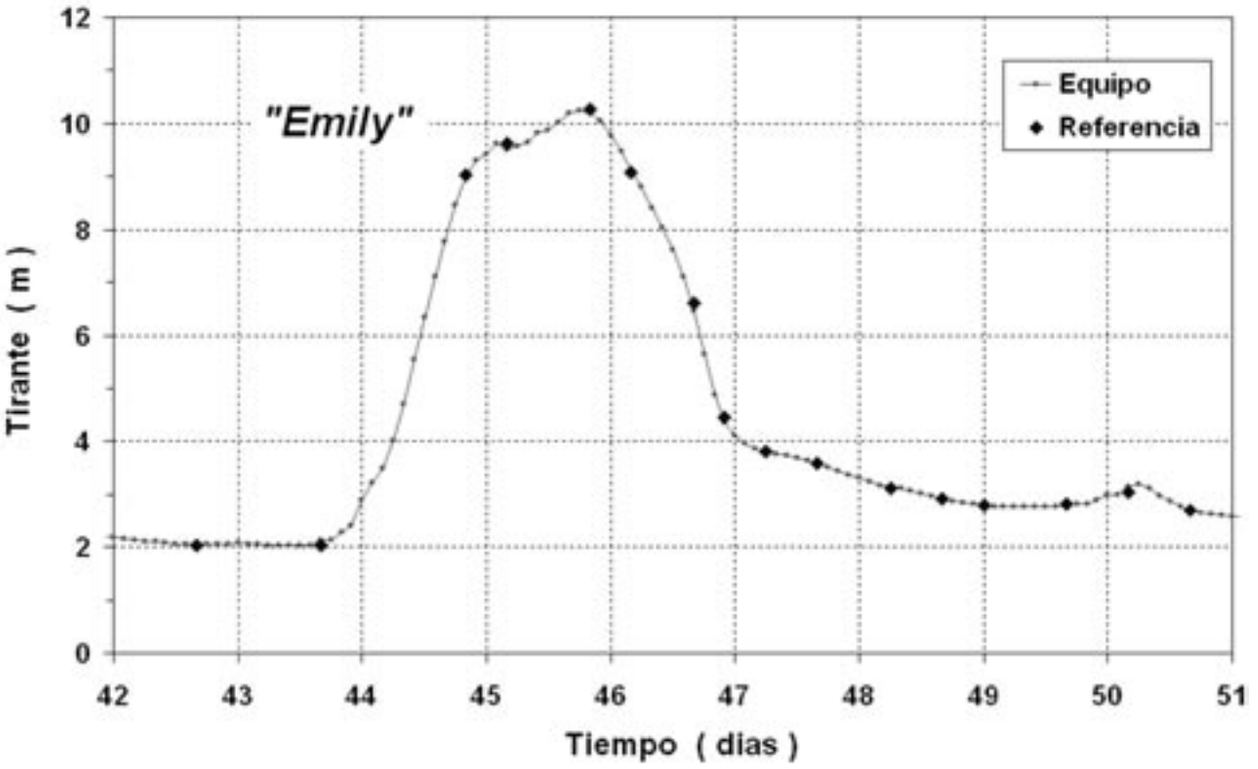

ilustración 10. Comparación entre el tirante medido por el equipo y el tirante de referencia durante el paso del huracán *Emily* (junio de 2005).

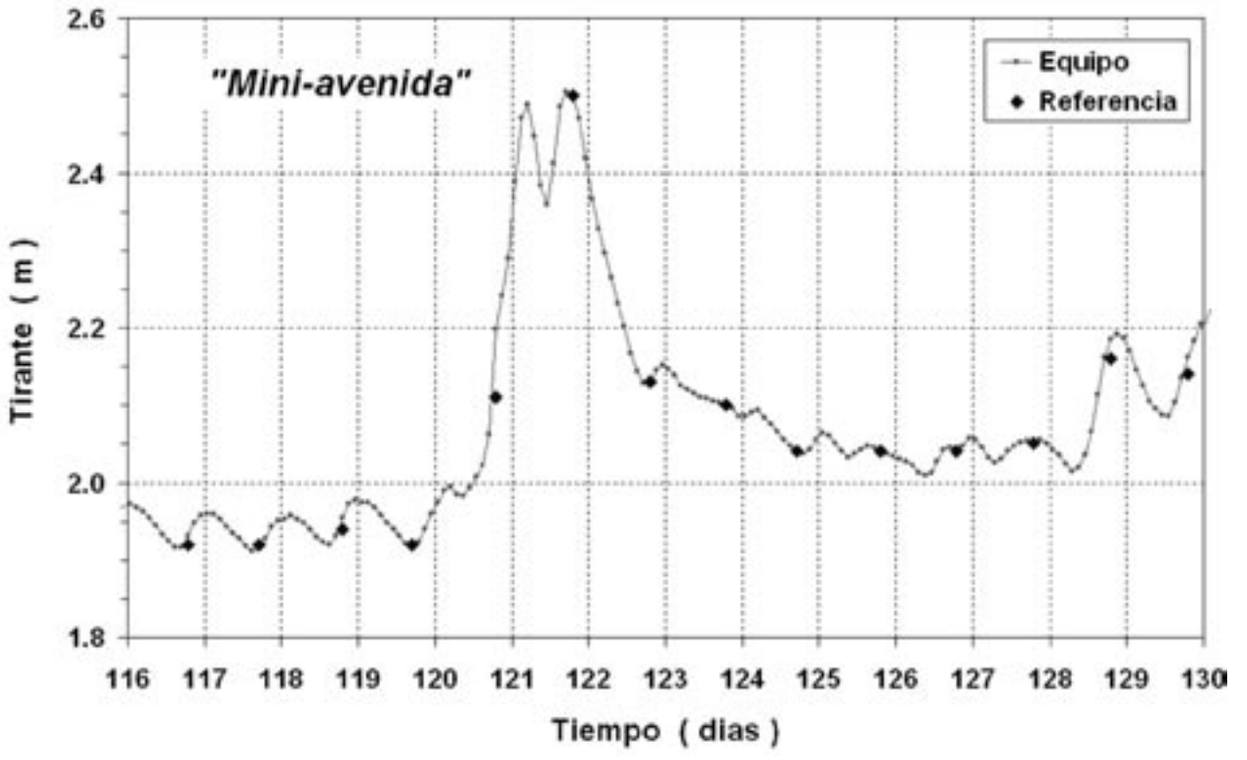

ilustración 11. Comparación entre el tirante medido por el equipo y el tirante de referencia, durante el paso de una lluvia pequeña (septiembre de 2005).

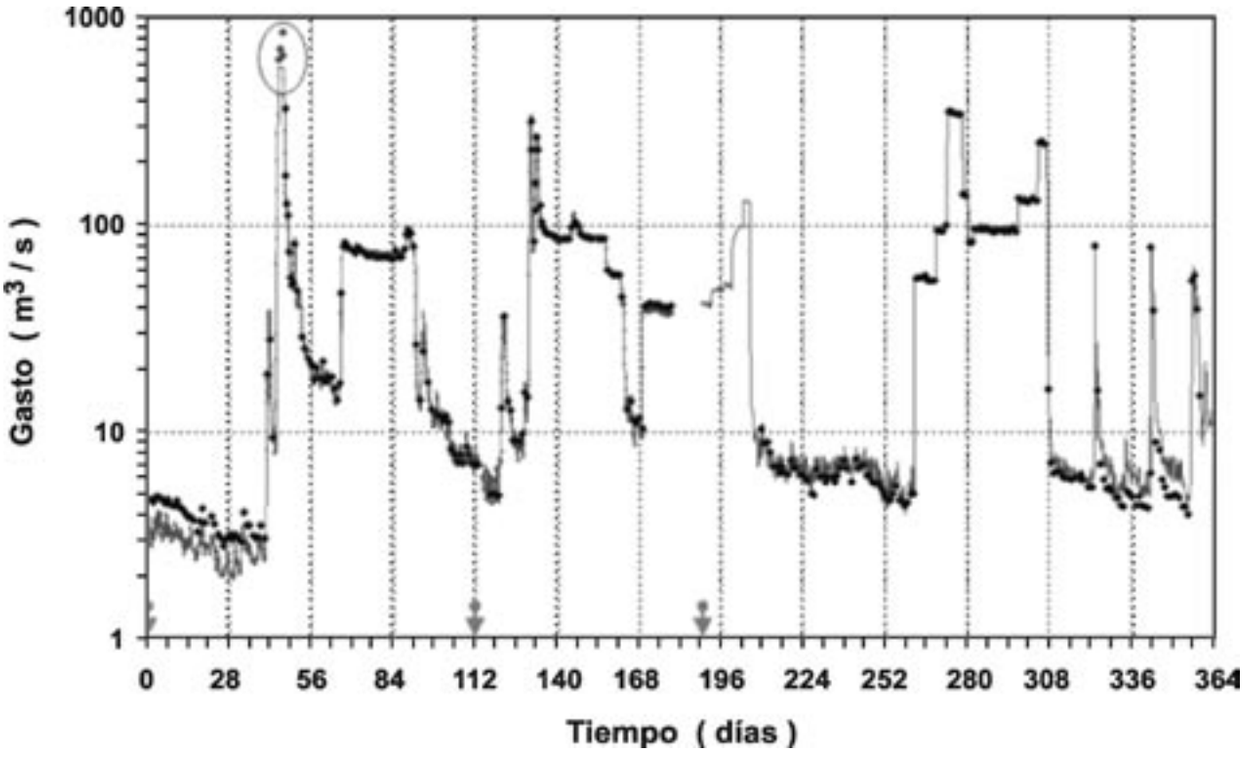

Ilustración 12. Comparación entre el gasto estimado por el equipo (desde el 6 de junio 2005 a las 17:00) y el gasto de referencia (datos de aforo de la Conagua). El óvalo indica un periodo donde no fue posible estimar el gasto (paso del huracán *Emily*).

con los gastos medidos en forma independiente por el personal de la Conagua (ilustración 12); aunque queda pendiente analizar en forma exhaustiva las diferencias entre estos gastos (se espera tener más datos para poder hacerlo).

Conclusión

Hasta donde sabemos, es la primera vez que en el país se pone en operación un equipo capaz de monitorear el gasto de un cauce natural en tiempo real. Un análisis preliminar de los resultados obtenidos en la estación hidrométrica Los Aldamas indica que es importante dar mantenimiento al equipo instalado aproximadamente cada cuatro meses, sobre todo con el fin de controlar las incrustaciones de sarro que tienden a formarse sobre el sensor de presión sumergible. Bajo esta condición, el equipo parece ser capaz de monitorear adecuadamente el tirante y el gasto en el río San Juan.

Todavía falta analizar en forma exhaustiva las diferencias entre los datos registrados por el equipo y los datos de aforo clásico obtenidos por la Conagua. También sería interesante investigar el siguiente punto: ¿con que resolución temporal se debe monitorear el gasto para poder estimar adecuadamente el volumen acumulado de agua que pasa por el río San Juan?

Agradecimientos

Los datos de aforo que sirvieron de referencia para evaluar el equipo instalado en Los Aldamas fueron obtenidos por Roel Palomares Quintanilla (Conagua).

Bibliografía

Arroyo Correa V. M., Aguilar Chávez A., Álvarez Bretón R. A., Bonola Alonso I., Gómez Lugo L., López Vázquez A., Mejía Astudillo V. G., Millán Barrera C., Pe-

droza González E. y Santana Sepúlveda S. (2004), *Mejoramiento de la medición en presas de almacenamiento y pozos agrícolas*, Informe Final del Proyecto HC-0411, IMTA/SEMARNAT, Jiutepec, Mor., México. 130 p.

IOC (1994). *Manual on sea level measurement and interpretation, Vol. II: Emerging technologies (UNESCO Manuals and Guides no. 14)*. Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)/UNESCO.

ISO (1995). *Measurement of liquid flow in open channels - Water-level measuring devices (ISO 4373: 1995(E))*. International Organization for Standardization (ISO), Genève.

___ (1996). *Measurement of liquid flow in open channels, Part 1: Establishment and operation of a gauging station (ISO 1100-1: 1996(E))*. International Organization for Standardization (ISO), Genève.

___ (1997). *Measurement of liquid flow in open channels - General guidelines for selection of method (ISO/TR 8363: 1997(E))*. International Organization for Standardization (ISO), Genève.

___ (1998). *Measurement of liquid flow in open channels, Part 2: Determination of the stage-discharge relation (ISO 1100-2: 1998(E))*. International Organization for Standardization (ISO), Genève.

___ (2004). *Hydrometry - Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method (ISO 6416: 2004(E))*. International Organization for Standardization (ISO), Genève.

ITRC (1999). *Water level sensor and datalogger testing and demonstration (ITRC Report R99 - 002)*. Irrigation Training and Research Center (ITRC), San Luis Obispo, California.

Ruiz V.M., Navarro J., Paredes M., Andrade B., Anguiano J., Delgado F., Begovich O., Íñiguez J. y Ramírez J. (2004). *Medición y operación remota en el distrito de riego 014 Río Colorado, Baja California y Sonora*. En: Gómez-Balandra M.A. *et al.* (ed.), *Anuario IMTA 2004*, pp. 112-120.

Semarnat (2004). Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas de disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales. *Diario Oficial de la Federación* (Primera Sección), jueves 29 de abril de 2004.

Tamari S., Aguilar Chávez A., Mejía Astudillo V., Álvarez Bretón R., López Vázquez A., Ortega Briones S. y D'Egremy González O. (2005). *Instrumentación de la estación de aforo Los Aldamas: Manual del usuario (Vers. 1.2, dicembre de 2005)*. IMTA / MovilTrack, Jiutepec (Mor.), México.

Autores

Serge Tamari. Doctor en Agronomía, Ciencia del Suelo, por el Instituto Nacional Agronómico de Paris-Grignon, Francia. Actualmente es especialista en hidráulica en la Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos.

Ariosto Aguilar Chávez. Licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Maestro y doctor en Ingeniería Hidráulica por la UNAM. Actualmente es Subcoordinador de Obras y Equipos Hidráulicos.

Víctor G. Mejía Astudillo. Pasante de Ingeniería Industrial por la UAEM. Áreas de investigación: pruebas de velocidad con sensores ultrasónicos de tiempo de tránsito en tuberías de gran diámetro, medición del gasto en cauces naturales con perfiladores acústicos. Actualmente es especialista en hidráulica en la Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos.

Alejandro López Vázquez. Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya. Maestro en Ciencias, Sistemas Digitales, por la Universidad de las Américas-Puebla. Becario del Centro Nacional de Metrología. Actualmente es especialista en hidráulica en la Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos.

Ricardo Álvarez Bretón. Maestro en Hidráulica por la UNAM. Ocupó el cargo de Subcoordinador de Obras y Equipos Hidráulicos por siete años. Ha coordinado equipos de trabajo dedicados a la evaluación de proyectos. Actualmente es especialista en hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Sebastián Ortega Briones. Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones. Trabaja en la compañía MovilTrack, S.A. de C.V.